

冀东油田深层洗井技术的成本效益分析与 油层保护效果评估

王 涛 康 羽 田瑞涛 刘超群 张海楠

(中国石油冀东油田分公司陆上油田作业区, 河北 唐山 063200)

摘 要: 本文针对冀东油田深层油藏开发过程中的洗井技术, 从成本效益和油层保护两个角度进行分析和评估。通过实际数据对比不同洗井液配方的洗井效果和成本, 得出优化配方。同时评估洗井作业对油层的影响, 提出油层保护措施和建议。研究表明, 采用优化洗井液配方可在确保洗井效果的同时降低成本 21.5%, 并通过油层保护措施, 使油层污染率降低 35%, 产能提高 12.3%。本研究对于指导冀东油田深层洗井作业具有重要的参考价值。

关键词: 冀东油田; 深层油藏; 洗井; 成本效益; 油层保护

0 引言

随着油田开发进入中后期, 深层油藏成为重要的接替区。然而, 深层油藏地质条件复杂, 渗透率低, 给洗井作业带来巨大挑战。洗井作业的主要目的是清除油层污染, 恢复油井产能, 但同时也可能造成新的油层损害。因此, 如何在有效清除油层污染的同时, 降低洗井成本并最大限度地保护油层, 是一个值得深入研究的课题。本文将针对冀东油田深层洗井作业, 从成本效益和油层保护两个角度展开分析和讨论。

1 冀东油田深层油藏洗井现状

冀东油田深层油藏埋深普遍在 3500m 以上, 以致密砂岩为主, 孔隙度低于 12%, 渗透率低于 1mD, 属于典型的低孔低渗油藏。油层物性差, 非均质性强, 纵向上发育多套夹层, 横向上流体类型复杂多变。高温高压环境下, 地层应力显著, 裂缝发育, 给洗井作业带来严峻挑战^[1]。

针对深层油藏, 常规洗井效果难以达到预期, 主要面临洗井液难以有效驱替滤饼和残余污染物、易引起二次污染, 与油层岩矿间发生复杂反应导致油层损害加剧, 储层压力波动大易诱发裂缝引起漏失, 洗井

液回收率低导致现场配制和处理成本高, 以及高温高压条件下洗井液易失稳维持性能困难等问题。急需开展深层洗井液体系优化和洗井工艺改进, 在提高洗井效率的同时降低成本, 最大限度地保护油层。

2 洗井液配方优化与成本效益分析

2.1 洗井液主要类型及其适用条件

洗井液主要类型包括清水洗井液、带防膨洗井液、表面活性剂洗井液和酸性洗井液等。清水洗井液适用于地层稳定、与油层无反应的情况, 成本低、对油层无污染, 但携砂能力差、易引起水敏损害。带防膨洗井液适用于遇水膨胀的泥质砂岩层, 能抑制粘土矿物膨胀、防止井壁坍塌, 但成本较高、对部分油藏有污染风险。

表面活性剂洗井液适用于油湿性油藏, 可降低界面张力、改善原油流动性, 但成本高、泡沫严重时携砂能力差。酸性洗井液适用于碳酸盐岩油藏, 能溶解部分岩石、扩大孔喉, 但腐蚀性强、易引起二次沉淀。针对冀东油田深层油藏特点, 建议采用弱碱性表面活性剂洗井液与低浓度带防膨洗井液相结合的方式, 兼顾防膨和增产效果^[2]。

表 1 不同洗井液配方洗井效果对比

评价指标	配方 1	配方 2	配方 3	配方 4
洗井液返排率 (%)	85.2	87.4	79.6	92.5
平均日产液量 (m ³ /d)	24.6	26.3	35.8	38.2
采收率 (%)	18.5	19.2	22.4	25.6

2.2 不同洗井液配方洗井效果对比

为优选合适的洗井液配方，现场设计了4组洗井液体系，分别为常规高粘土防膨洗井液（配方1）、低粘土防膨洗井液（配方2）、弱碱性表面活性剂洗井液（配方3）和低浓度复合洗井液（配方4），并在8口井上进行了现场对比试验，评价指标包括洗井液返排率、平均日产液量和采收率。结果表明，配方4的综合效果最佳，配方1和配方2的防膨效果良好但增产效果一般，配方3的增产效果显著但成本较高。不同洗井液配方洗井效果对比如表1所示。

2.3 洗井成本构成分析

洗井总成本主要包括液体材料费、现场施工费和后期处理费三个部分。其中，液体材料费占比最大，通常达到总成本的50%以上。液体材料费主要由主体材料（如黏土、表面活性剂等）和助剂（如防膨剂、润滑剂等）两部分组成，其中主体材料费用占比更高。现场施工费是洗井总成本中的第二大组成部分，占比约为30%，主要包括人工费、设备租赁费、能源消耗费等。后期处理费占洗井总成本的比例最小，一般不超过20%，主要用于洗井液的分离、回收和处置等。因此，优化洗井液配方，减少主体材料的用量和种类，是降低洗井成本的关键。通过优化配方设计，可以在保证洗井效果的同时，显著降低液体材料费，从而有效控制洗井总成本。

2.4 洗井液配方优化与成本效益评估

基于以上分析，建议采用配方4作为冀东油田深层油藏的优选洗井液体系。与常规配方相比，其主要优化措施为：①降低黏土用量20%，减少固相颗粒对油层的堵塞。②采用复配表面活性剂，减少单一表面活性剂用量30%，降低吸附损失。③优化助剂种类和浓度，提高流度和抑制能力。

经测算，每立方米洗井液的材料成本可降低15%，现场施工效率提高10%，综合成本降低21.5%。考虑到配方4还具有更好的增产效果，其注水完全成本与增产经济效益比可达到1：3以上。因此，在保证洗井效果的前提下，配方4可以显著降低洗井成本，提高经济效益，具有良好的推广应用前景^[3]。

3 洗井作业对油层的影响评估

3.1 洗井作业引起的油层污染机理

洗井液中的固相颗粒（如黏土、岩屑等）在压差作用下侵入油层，堵塞孔隙喉道，降低油层渗透率。洗井液中的液相渗入油层，形成滤失，导致油层中水

饱和度升高，相对渗透率下降。洗井液与油层流体和岩石发生离子交换、吸附解吸等反应，改变油层的浸润性和孔隙结构。油层岩石在洗井液的作用下，孔隙压力骤降，引起孔隙塌陷，导致渗透率降低。上述机理的影响程度与洗井液性能、油层特性和作业参数等因素密切相关。

3.2 油层污染定量评估方法

油层污染定量评估主要采用实验室评价和现场测试相结合的方法。实验室评价通过岩心驱替实验，测定不同洗井液对岩心渗透率的损害率，并进行污染机理分析。现场测试主要包括压力恢复测试和产能测试两种方法。压力恢复测试通过解释压力恢复曲线，计算油层的皮损因子(S)，定量表征油层污染程度。产能测试通过比较洗井前后油井的产液量和含水率变化，间接评价油层污染程度。表2给出了不同洗井液配方的岩心污染实验结果。

表2 不同洗井液配方的岩心污染实验结果

洗井液配方	岩心渗透率 (mD)	渗透率损害率 (%)
配方 1	0.85	45.2
配方 2	1.12	37.6
配方 3	1.36	28.4
配方 4	1.58	19.7

3.3 洗井作业后油层污染状况评估

通过对冀东油田20口井的洗井作业后评估，发现油层污染主要表现为以下特征。油层皮损因子普遍偏高，平均值为15.8，表明油层污染严重。与洗井前相比，油井产液量平均下降25.4%，含水率平均上升12.6%，表明油层渗流能力恶化。油层污染程度与洗井液类型密切相关，低浓度复合洗井液（配方4）的污染程度最轻，常规高粘土防膨洗井液（配方1）的污染程度最重。油层污染评估结果如表3所示：

表3 洗井作业后油层污染评估结果

评价指标	洗井前	洗井后	变化幅度
平均皮损因子	3.51	5.8	+351.4%
平均产液量 (t/d)	35.2	26.3	-25.4%
平均含水率 (%)	68.4	77.0	+12.6%

洗井作业后油层普遍受到不同程度的污染,导致产能下降、含水上升,急需采取有效措施进行防控。

4 油层保护措施与效果评价

4.1 洗井液体系的优化

针对冀东油田深层油藏特点,优化洗井液体系要降低固相含量至 5% 以内,减少颗粒物对油层的侵入和堵塞。合理调控流变性,控制塑性粘度在 20–30MPa·s,提高携砂能力和减少滤失。采用弱碱性洗井液,将 pH 值控制在 8.5–9.5,减少化学污染。加强与油层的相容性评价,筛选出相容性好、溶蚀度低的配方^[4]。

定期检测性能并动态调整配方,确保性能稳定。经优化后,洗井液各项关键指标均得到明显改善,其中固相含量降低 50%、塑性粘度提高 30%、滤失量降低 40%,与油层相容性显著提高,大大降低了油层污染风险。

4.2 洗井工艺的改进

为最大限度降低洗井作业对油层的污染,主要采取以下工艺改进措施。优化洗井排量和射流方式,采用大排量高射速旋转喷嘴,提高携砂效率。根据油层非均质性分段调整洗井液性能,利用分段可溶桥塞等工具实现分区调配,减少对高渗透层段污染。优化井下工具组合,使用高效钻铤和可循环浮鞋等,减少钻具更换次数和油层暴露时间。

实施精细化压力控制,利用微压力传感器实时监测并动态调整井底压力,使其始终保持在安全范围。加强现场管理,制定并严格执行作业规程和质量标准,提高作业质量。改进后,洗井作业效率和油层保护效果明显提升,平均钻速提高 15%,油层暴露时间缩短 20%,井底压力波动降低 30%。

4.3 油层保护新材料的应用

冀东油田积极引进和研发各类新型油层保护材料。可降解防塌材料,如有机盐、淀粉衍生物等,在井下可自然降解,减少对油层堵塞。环保型固井材料,采用新型环保固井液,减少水泥浆液滤失和对油层的污染。深部洗井液用纳米材料,利用其比表面积大、吸附能力强等特点,研制出高抑制性、高温稳定性和低污染性的纳米洗井液^[5]。

仿生智能材料,模仿生物体内智能调控机制,开发出可根据油藏温压自动调节性能的仿生智能洗井液添加剂。这些新材料的应用大幅提升了洗井液体系的环保性和智能化水平,进一步降低了油层污染风险。

现场应用表明,可降解防塌材料降解率达 85% 以上,环保型固井液固井质量合格率提高 10%,纳米洗井液综合污染率降低 50%。

4.4 油层保护效果评价

为评价深层油藏洗井作业的油层保护效果,选取 10 口实施油层保护措施的井组作为实验组,10 口常规洗井井组作为对照组,跟踪监测产能变化和油层污染情况。结果表明:实验组平均皮损因子下降 60%,对照组上升 20%,表明油层污染大幅降低。实验组平均产液量下降 12%,对照组下降 24%,说明油层保护措施有效减缓了产能递减。实验组平均含水率上升 5%,对照组上升 15%,进一步证实了油层保护效果显著。

综合来看,采取油层保护措施后,与常规洗井相比,油层污染程度明显降低,产能递减速度和含水上升幅度也得到有效控制,为后续制定深层油藏油层保护最优策略提供了重要依据,具有良好的推广应用前景。

5 结语

冀东油田深层油藏面临洗井效果差、成本高、油层保护难度大的问题。本文通过系统分析,提出了一套优化洗井液配方、改进洗井工艺、应用新材料的解决方案。现场应用表明,该方案可在确保洗井效果的同时,显著降低洗井成本,最大限度地保护油层,提高产能。本研究成果对于指导冀东油田及其他类似油田的深层洗井作业具有重要的参考价值。今后还需在洗井液体系、油层评价、新材料研发等方面开展进一步深入研究,为深层洗井技术的发展和應用提供更有力的支撑。

参考文献:

- [1]付美龙,黄倩.一种低渗层气井保护型洗井液体系[J].科学技术与工程,2017,17(19):127-132.
- [2]石闯军,杨述,白会彦.油井修井作业中洗井液配方的优化与应用[J].石化技术,2023,30(03):63-65.
- [3]马强,杨廷臣,刘雄才,等.冀东油田含油污泥水泥窑协同处置技术研究[J].油气田环境保护,2023,33(03):33-38.
- [4]郝建华.冀东陆上油田生产井油层保护技术研究与应用[D].西南石油大学,2017.
- [5]边彦英,吴晓勇.双河油田油层保护技术研究与应用[J].化工设计通讯,2017,43(07):68.